

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202012052



# “2-4”模型及关联规则下塔吊 坍塌事故致因分析

唐琳瑶, 祁神军, 叶云珊, 张云波

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门, 361021)

**摘要:** 基于事故致因“2-4”模型, 从人、物、环境、组织 4 个层面构建塔吊坍塌事故致因初步模型. 对收集的 100 起塔吊坍塌事故案例, 运用“0-1”法则建立事故致因数据库; 通过 Apriori 算法和“2-4”模型, 挖掘塔吊坍塌事故的致因链. 结果表明: 缺乏安全教育培训、安全生产责任制度未落实、安全生产保障制度缺失为重点致因, 且均属于“2-4”模型中的组织层面; 提出塔吊坍塌事故预防措施, 并通过实证分析证明了致因链及预防措施的有效性.

**关键词:** 关联规则; Apriori 算法; 塔吊坍塌事故; 事故致因“2-4”模型; 事故致因链

**中图分类号:** X 947      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2022)03-0323-07

## Cause Analysis of Tower Crane Collapse Accident Using “2-4” Model and Association Rules

TANG Linyao, QI Shenjun, YE Yunshan, ZHANG Yunbo

(School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Based on the “2-4” model of accident cause, the preliminary model of tower crane collapse accident cause was constructed from four levels of human, material, environment and organization. Based on 100 cases of tower crane collapse accident, the database of accident cause was established by using “0-1” rule. Through the Apriori algorithm and the “2-4” model, the cause chain of the tower crane collapse accident was obtained. The results showed that the lack of safety education and training, the failure to implement the safety production responsibility system, and the lack of safety production guarantee system were key causes, and they all belonged to the organizational level in the “2-4” model. Preventive measures of tower crane collapse accident were put forward, and effectiveness of causal chain and preventive measures were proved by empirical analysis.

**Keywords:** association rules; Apriori algorithm; tower crane collapse accident; “2-4” model of accident cause; accident cause chain

随着高层建筑的日益普及, 塔吊的应用越发广泛, 但塔吊给施工带来便捷的同时, 也存在诸多安全隐患. 这些安全问题一旦发生, 不仅会造成巨大的经济损失, 还会造成人员伤亡. 据住建部发布的数据显示, 自 2015 年 1 月至 2019 年 12 月, 全国共发生房屋市政工程生产安全事故 2 199 起, 造成 3 840 人死亡, 其中, 较大事故 117 起. 2019 年, 较大事故中塔吊安全事故占 30.43%, 仅次于土方、基坑塌陷<sup>[1]</sup>. 因此, 对塔吊相关安全事故致因及防范措施进行研究具有重要意义.

目前, 国内外针对塔吊安全事故的研究主要分为两个方面. 一方面, 通过典型案例分析塔吊使用过

**收稿日期:** 2020-12-22

**通信作者:** 祁神军(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事建筑安全的研究. E-mail: qisj972@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(71303082); 福建省软科学科技计划项目(2019R0056)

程中某一阶段的安全致因,如影响塔式起重机操作安全的因素<sup>[2]</sup>、影响塔式起重机安装/拆卸安全的因素等<sup>[3]</sup>.另一方面,通过大量案例对塔吊安全问题进行量化分析.赵挺生等<sup>[4]</sup>采用贝叶斯建模方法构建塔吊使用阶段的安全风险评价模型,分析塔吊使用阶段 4 个关键的安全影响因素.丁科等<sup>[5]</sup>运用事故致因理论对塔吊事故致因进行统计,并归纳分析事故风险因素.塔吊安全事故的发生通常不是由某个原因引起的,而是多个原因共同作用的结果.这些原因之间存在错综复杂的关联,但上述研究往往忽略了这些关联.

塔吊安全事故类型多样,其中,塔吊坍塌是最主要的类型<sup>[6]</sup>,故将其作为分析重点.受文献<sup>[7]</sup>启发,本文将 Apriori 算法运用于塔吊坍塌事故的研究中,通过分析大量塔吊坍塌事故报告,确立高关联度致因及各个致因之间的置信度.结合“2-4”模型得出事故致因链,深入分析致因链路径,确定预防塔吊坍塌事故的关键因素,提出具有一定可靠性和针对性的预防措施.

## 1 塔吊坍塌事故致因分析及模型的建立

### 1.1 事故致因“2-4”模型

文献<sup>[8-9]</sup>认为任何事故都发生在组织中,事故原因分为组织内部原因和外部原因,事故致因分析与管理的关键在于组织内部原因,故提出“2-4”模型,“2”表示事故原因划分为组织行为(层面Ⅱ)与个人行为(层面Ⅰ);“4”表示将组织行为划分为指导行为(阶段Ⅳ)和运行行为(阶段Ⅲ),将个人行为划分为习惯性行为(阶段Ⅱ)和一次性行为及物态(阶段Ⅰ),共 4 个阶段,其模型如图 1 所示.图 1 中:阶段Ⅰ~Ⅳ分别对应安全事故发生的直接原因、间接原因、根本原因和根源原因,由此构成一条安全行为致因链.

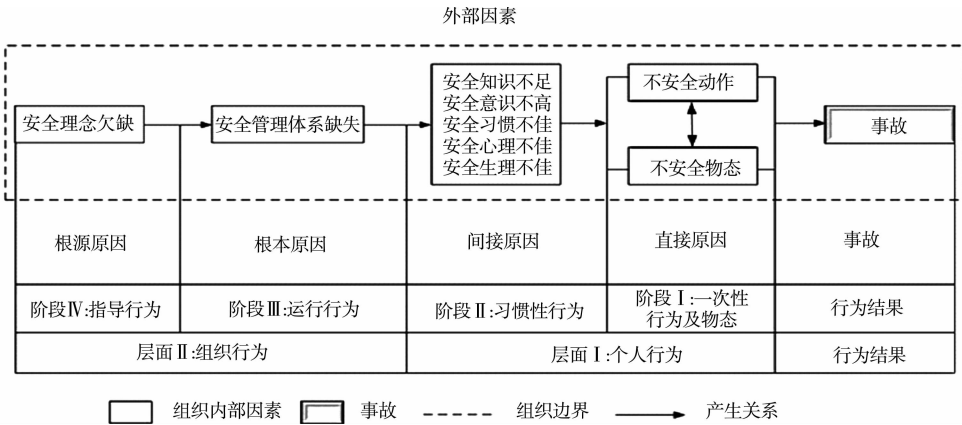


图 1 事故致因“2-4”模型

Fig. 1 “2-4” model of accident cause

### 1.2 事故致因初步模型的构建

对收集的塔吊坍塌事故报告进行分析,结合相关文献,运用“2-4”模型和事故致因理论,通过人、物、环境、组织 4 个因素构建塔吊坍塌事故致因初步模型,如图 2 所示.

### 1.3 事故致因链

1.3.1 事故致因数据库及致因频数、频率分析 在中华人民共和国住房和城乡建设部及各省市的应急管理厅官网收集 100 起塔吊坍塌事故案例,以确保数据的准确性和完整性.对事故案例发生区域和发生时间进行统计分析,东北、西北、华北、华中、华南、华东、西南区域的事故数量分别为 13,8,9,19,13,22,14 起;第 1 季度、第 2 季度、第 3 季度、第 4 季度的事故数量分别为 17,25,26,32 起.由此可知,事故案例包含绝大部分区域,且各季度均有分布,说明发生区域与发生时间对事故致因分析的影响较小,可排除无关因素的影响.

塔吊坍塌事故致因是多层次、多方面的,事故致因之间的关系错综复杂.赵挺生等<sup>[10]</sup>运用系统思想建立 5 个塔吊安全系统层次,识别 56 项塔吊安全影响因素,表明塔吊安全是多层次、多维度因素的耦合

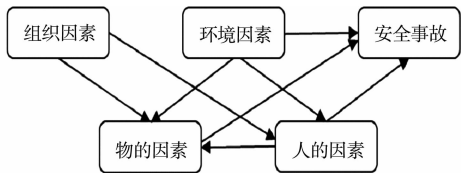


图 2 塔吊坍塌事故致因初步模型

Fig. 2 Preliminary model for cause of tower crane collapse accident

结果. 张潇等<sup>[11]</sup>从事故时间特性、事故类型和等级、发生阶段、致因 4 个方面揭示塔吊安全事故的发生规律. Shapira 等<sup>[12]</sup>根据行业专家的意见及专业知识, 提出 21 项塔吊安全影响因素, 并评估其影响程度. 综合相关研究及“2-4”模型、事故致因初步模型, 通过人、物、环境、组织 4 个因素分析塔吊坍塌事故致因, 确定 4 个一级指标, 6 个二级指标及 22 个三级指标. 采用“0-1”法则, 将 100 起塔吊坍塌事故调查报告的文本信息结构转化为数据型结构, 形成事故致因数据库. 塔吊坍塌事故致因频数及频率, 如表 1 所示. 表 1 中:  $n$  为频数;  $f$  为频率.

表 1 塔吊坍塌事故致因频数及频率  
Tab. 1 Frequency and relative frequency cause of tower crane collapse accident

一级指标	二级指标	三级指标	$n$	$f/\%$
人的因素 A	不安全行为 A1	操作失误 A11	25	25
		违章作业 A12	76	76
		不正确指挥 A13	31	31
	不安全习惯 A2	不注意安全隐患的排查 A21	92	92
		不按规范作业 A22	84	84
		安全操作技术和规程未掌握 A23	58	58
物的因素 B	不安全物态 B1	塔吊超载 B11	17	17
		塔吊设计问题 B12	11	11
		维修保养不到位 B13	58	58
		塔吊结构部位或安全装置的可靠性 B14	50	50
环境因素 C	不安全环境 C1	塔吊基础的可靠性 C11	13	13
		多塔作业情况 C12	4	4
		作业时风速 C13	6	6
组织因素 D	不安全监管过程 D1	现场安全管理与监督松懈 D11	95	95
		缺乏安全教育培训 D12	39	39
		安全技术交底不到位 D13	28	28
		缺乏安全专项施工方案 D14	39	39
		对相关公司或人员资质审查不严 D15	64	64
		塔吊施工资料审核不严 D16	36	36
		政府部门监督管理不到位 D17	61	61
	安全管理体系缺失 D2	安全责任制度未落实 D21	75	75
		安全生产保障制度缺失 D22	58	58

1.3.2 基于 Apriori 算法的塔吊坍塌事故致因链 Apriori 算法是关联规则挖掘的重要方法, 运用该算法对塔吊坍塌事故致因数据库中的致因因素进行关联规则的挖掘. 通过迭代, 先检索出数据库中所有频繁项集, 即支持度不低于用户设定阈值的项集; 再利用频繁项集构造出满足最小置信度的规则<sup>[13-14]</sup>.

1) 最大频繁项集的挖掘. 支持度和置信度的阈值在关联算法中十分重要, 若阈值过大, 关联规则较少, 不足以支撑进一步分析; 若阈值过小, 关联规则较多, 则不利于致因链的形成. 通过计算对比不同支持度下的频繁项集, 从而确定最合适的支持度, 当支持度为 0.30, 0.10 时, 频繁项集较小; 当支持度为 0.01 时, 频繁项集较大; 当支持度为 0.05 时, 频繁项集较为合适. 因此, 确定支持度为 0.05, 其频繁项集, 如表 2 所示.

表 2 支持度为 0.05 时的频繁项集  
Tab. 2 Frequent itemsets with 0.05 support

频繁项集	支持度	$n$
{A12, A21, A22, A23, B13, B14, D11, D13, D15, D17, D21}	0.07	7
{A12, A21, A22, A23, B13, B14, D11, D12, D15, D17, D21, D22}	0.05	5
{A12, A21, A22, A23, B13, B14, D11, D12, D15, D17, D22}	0.07	7
{A12, A21, A22, A23, B13, B14, D11, D12, D17, D21, D22}	0.06	6
{A12, A21, A22, A23, B13, B14, D11, D12, D15, D21, D22}	0.07	7
{A12, A21, A22, A23, B13, B14, D11, D12, D15, D17, D21}	0.06	6
{A12, A21, A22, A23, B13, B14, D11, D15, D17, D21, D22}	0.06	6

2) 产生关联规则并构成致因链. 利用 Apriori 算法确定最大频繁项集中的因素两两之间的置信度. 将 Apriori 算法与实际情况相结合<sup>[15]</sup>, 设置信度为 0.600. 把最大频繁项集中不同因素设为原因因素进行计算, 运用计算结果中的 lift 值筛选结果. 当  $lift=1$  时, 说明两个因素之间不存在直接影响关系; 当  $lift<1$  时, 两个因素负相关, 具有阻碍作用; 当  $lift>1$  时, 说明两个因素正相关, 具有促进作用, 以此作为致因链分析的要素. 塔吊坍塌事故致因因素的分析必须参照事故致因理论, 遵循上层致因导致下层致因, 而下层致因不能导致上层致因的原则. 基于此, 利用置信度矩阵表示不同因素之间的关联, 其中的数值表示横向因素发生导致纵向因素也同时发生的概率. 由此可得置信度表, 如表 3 所示.

表 3 置信度表  
Tab. 3 Confidence table

指标	置信度											
	A12	A21	A22	A23	B13	B14	D11	D12	D15	D17	D21	D22
A12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A21	0.793	0	0.870	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A22	0.905	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A23	0.862	0.948	0.914	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B13	0	0.931	0	0	0	0.810	0	0	0	0	0	0
B14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D11	0	0.926	0.842	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D12	0	0.949	0.923	1.000	0	0	0.974	0	0	0	0	0
D15	0	0.922	0.922	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D17	0	0	0.852	0.623	0	0	0	0	0.721	0	0	0
D21	0	0	0	0	0	0	0.960	0	0.653	0	0	0
D22	0	0	0	0	0	0	0.982	0	0.655	0	0	0

3) 事故致因链分析. 根据置信度表中各致因之间的关系及置信度, 结合事故致因“2-4”模型建立塔吊坍塌事故致因链, 如图 3 所示.

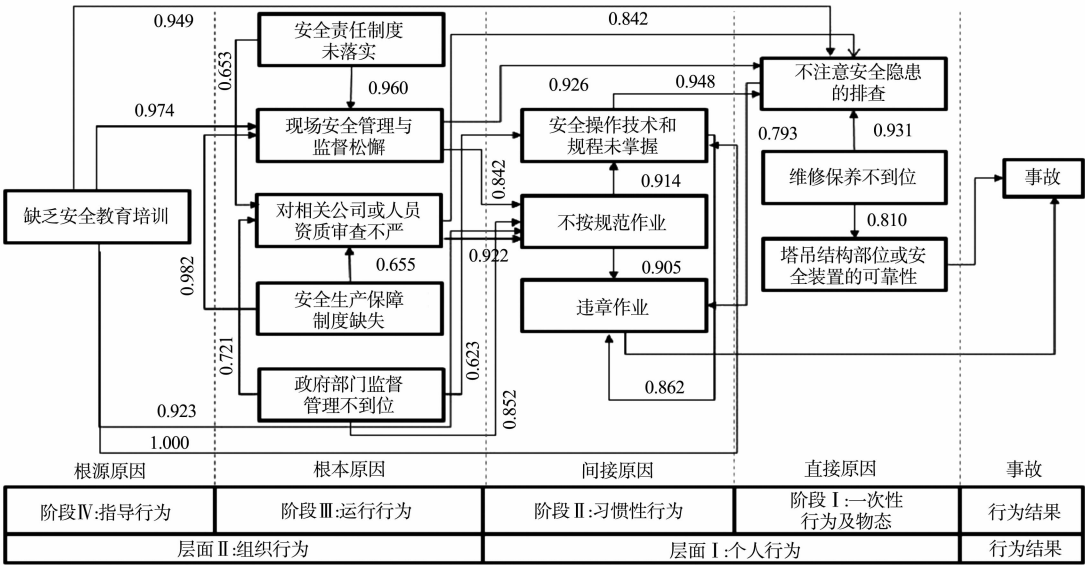


Fig. 3 Cause chain of tower crane collapse accident based on “2-4” model

由图 3 可知:缺乏安全培训和安全责任制度未落实会产生现场安全管理和监督松懈、对相关公司或人员资质审查不严及其他后续问题,同时,其对现场安全管理和监督松懈的影响极其突出,置信度分别高达 0.982,0.960. 在不安全监管过程中,施工人员缺乏安全教育培训会引起安全操作技术和规程未掌握,导致现场安全管理和监督松懈、不按规范作业和不注意安全隐患排查的概率极高,置信度为 0.900 以上,这些因素进一步导致违章作业的出现. 维护保养不到位会造成不注意安全隐患的排查,影响塔吊结构部位或安全装置的可靠性,最终导致安全事故的发生.

在致因链中,缺乏安全教育培训、安全责任制度未落实、安全生产保障制度缺失这 3 项致因产生的路径最多,且与其他致因之间关联的置信度较高.结合事故致因“2-4”模型进行分析,可发现缺乏安全教育培训属于“2-4”模型中组织行为层面阶段Ⅳ的安全理念欠缺,属于安全事故的根源原因;安全生产责任制度未落实、安全生产保障制度缺失属于组织行为层面阶段Ⅲ的安全管理体系缺失,属于安全事故的根本原因.因此,将这 3 个致因作为重点致因进行分析.

## 2 塔吊坍塌事故预防的策略及建议

由事故致因链可知,组织行为层面的致因进一步影响个人行为层面的致因,如违章作业、不注意安全隐患的排查等.因此,将预防策略重点放在组织层面,针对政府及相关监管部门、施工企业和现场管理人员影响塔吊施工安全的组织主体,分别提出具有针对性和可行性的策略及建议.

### 2.1 政府及相关监管部门

由事故致因链可知,确保安全生产责任制度的落实和保障可从源头预防和减少塔吊坍塌事故.因政府部门监督管理不到位引发事故的频率为 61%,这些不到位主要体现在对施工生产安全检查不到位、对施工手续审查不严,以及未严格督促下属部门履行职责.政府及相关监管部门是安全生产责任制度的制定者和监督者,是预防塔吊坍塌事故的先手,故对政府及相关监管部门提出以下 4 点建议.

1) 健全安全生产责任制度.政府及相关监管部门从以往事故中吸取经验教训,制定具有针对性的政策.例如,以往存在部分项目审批手续不全擅自开工建设的行为,相关单位未能察觉,甚至是察觉后未严格进行查处.对此,政府及相关监管部门除建立并执行审核机制外,还应针对违规行为建立处罚机制.

2) 建立监管部门内部的责任机制.政府及相关监管部门除了严格监管施工企业外,还应建立部门内部责任机制,对相关工作人员进行约束,避免由于监管不力、工作疏忽等问题造成不良后果.

3) 积极推动安全生产知识学习.部分项目往往为了节约成本和时间而忽视安全生产知识培训,加之我国建筑行业从业人员的素质水平参差不齐,安全生产知识的普及率并不高,从而导致很多施工安全事故的发生.因此,政府及相关监管部门可以出台相关政策,推动安全生产知识的普及.例如,进行公益安全生产知识讲座,并对积极开展安全生产知识培训的施工企业予以一定补贴.

4) 加强对高技术含量及危险性工种的监管.针对塔吊、强电和高空等具有较高技术含量和危险性的工种,除了加强安全生产知识学习外,还需要健全特种作业人员的资格认证体系.特种作业人员应具备专业知识,持证上岗,以降低安全事故发生的概率.

### 2.2 施工企业

由事故致因链可知,安全生产责任制度未落实和安全生产保障制度缺失会导致施工现场安全管理与监督松懈,进而产生不规范作业、对安全隐患的疏忽、不规范作业等问题.施工企业作为施工过程的参与者,是安全事故预防过程中将各种预防措施落到实处的关键,故对施工企业提出以下 2 点建议.

1) 加强施工现场安全生产管理,建立责任机制和合理的奖惩制度.一方面,施工企业应促进监管部门的相关政策落到实处,确定政策对应现场各部门应如何实施;另一方面,需建立安全现场生产责任制,明确规定各部门的工作要求,将责任层层划分,落实到个人,同时,建立合理的奖惩制度,对施工过程中的失职、渎职造成安全事故和损失的部门和个人予以惩罚,对积极落实安全生产责任制并严格执行的部门和个人予以奖励,促进良性循环.

2) 加强资质、审批手续审查和管理.对相关公司或人员资质审查不严占比引发事故的频率为 64%,项目现场管理人员必须具备相应资质,不得弄虚作假.特殊工种必须有相应资质,做好资质审查及相关记录归档,方便责任划分与事故追责.项目建设必须做好审批手续核查,若审批手续不齐全,禁止开工.

### 2.3 现场管理人员

施工作为工程项目的关键环节,施工现场管理十分重要.由现场安全管理与监督松懈引发事故的频率高达 95%.现场安全管理与监督松懈会引起不按规范作业、不注意安全隐患排查等问题,且置信度均高于 0.900.因此,现场管理人员除了应当严格落实相关部门及施工企业的安全管理制度外,还需要确保现场施工过程安全进行,故对现场管理人员提出以下 3 点建议.

1) 做好设施维护及安全隐患排查.因维修保养不到位和不注意安全隐患的排查引发事故的频率分



## 4 结论

1) 将塔吊坍塌事故主要致因中的人、物、环境、组织4个因素划分为一级指标,包含6个二级指标及22个三级指标.

2) 通过Apriori算法识别得出12项重点致因,并结合“2-4”模型,从组织行为和个人行为两个层面将致因划分为4个阶段,得出塔吊坍塌事故致因链.

3) 缺乏安全教育培训是组织层面的根源原因,安全生产责任制度未落实、安全生产保障制度缺失是组织层面的根本原因,应将组织层面的管理作为预防事故发生的重点.

4) 提出健全安全生产责任制度、加强施工现场安全生产管理、建立责任机制和合理的奖惩制度等具有针对性的预防策略,但仍存在需要改进的地方,例如,塔吊维修保养不到位等因素的置信度相对较小,但不能忽略这类与塔吊设备及维护相关致因导致的塔吊坍塌事故.

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.住房和城乡建设部办公厅房屋市政工程生产安全事故和建筑施工安全专项治理行动情况的通报[EB/OL]. [http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201903/t20190326\\_239913.html](http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201903/t20190326_239913.html).
- [2] VIVIAN W Y T, IVAN W H F. Tower crane safety in the construction industry: A Hong Kong study[J]. Safety Science, 2011, 49(2): 208-215. DOI: 10.1016/j.ssci.2010.08.001.
- [3] SHIN I J. Factors that affect safety of tower crane installation/dismantling in construction industry[J]. Safety Science, 2015, 72: 379-390. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.10.010.
- [4] 赵挺生,周炜,徐凯,等.塔吊使用阶段安全风险分析与贝叶斯建模[J].科学技术与工程, 2019, 19(11): 350-356. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2019.11.054.
- [5] 丁科,胡昊,高振锋.塔式起重机事故安全风险因素辨别与分析[J].施工技术, 2010, 39(11): 110-112.
- [6] 余群舟,孙博文,骆汉宾,等.塔吊事故统计分析[J].建筑安全, 2015, 30(11): 10-13. DOI: 10.3969/j.issn.1004-552X.2015.11.004.
- [7] 黄常海,高德毅,胡基平,等.基于Apriori算法的船舶交通事故关联规则分析[J].上海海事大学学报, 2014, 35(3): 18-22. DOI: 10.13340/j.jsmu.2014.03.004.
- [8] 傅贵,殷文韬,董继业,等.行为安全“2-4”模型及其在煤矿安全管理中的应用[J].煤炭学报, 2013, 38(7): 1123-1129.
- [9] 傅贵,杨春,殷文韬,等.行为安全“2-4”模型的扩充版[J].煤炭学报, 2014, 39(6): 994-999.
- [10] 赵挺生,周炜,徐凯,等.复杂社会技术系统下的塔吊安全思考[J].中国安全科学学报, 2018, 28(6): 153-159. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.06.026.
- [11] 张潇,张伟.塔式起重机安全事故统计分析[J].工业安全与环保, 2019, 45(9): 24-29.
- [12] SHAPIRA A, LYACHIN B. Identification and analysis of factors affecting safety on construction sites with tower cranes[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2009, 135(1): 24-33. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:1(24).
- [13] 雷煜斌,陈兆波,曾建潮,等.基于关联规则的煤矿瓦斯事故致因链研究[J].煤矿安全, 2016, 47(8): 240-243. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2016.08.067.
- [14] 许未,何世伟,刘朝辉,等.基于关联规则的铁路事故致因网络构建与分析[J].铁道运输与经济, 2020, 42(11): 72-79. DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2020.11.13.
- [15] 郭涛,张代远.基于关联规则数据挖掘Apriori算法的研究与应用[J].计算机技术与发展, 2011, 21(6): 101-103, 107. DOI: 10.3969/j.issn.1673-629X.2011.06.027.
- [16] 宜宾市应急管理局.珙县玛斯兰德国际(酒店)社区工程“2019.2.24”塔吊垮塌较大事故调查报告[EB/OL]. (2019-09-17)[2020-12-20]. [http://yjglj.yibin.gov.cn/tzgg/201909/t20190917\\_1127149.html](http://yjglj.yibin.gov.cn/tzgg/201909/t20190917_1127149.html).

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)